

## Verfahren zur Bewertung der Betriebsbedingungen einer Maschine oder einer Anlage

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bewertung der  
5 Betriebsbedingungen einer Maschine oder einer Anlage.

Bisher wurden zur Bewertung der Betriebsbedingungen einer Maschine oder einer Anlage visuelle Extrapolationen eines, bspw. kritischen, Messwertverlaufs und/oder subjektive  
10 Bewertungen der Auswirkungen auf Parameter der Maschine oder der Anlage vorgenommen, um Betriebsbedingungen einer Maschine oder einer Anlage abzuschätzen und entsprechend zu reagieren, indem der Parameter entsprechend der Bewertung bspw. durch Vorgabe eines Sollwertes für Parameter verändert oder in  
15 sonstiger Art und Weise beeinflusst wird.

Dabei wurden Anpassungs-/Regressionsfunktionen einer Datenbasis angepasst und eine Optimierung durch iterative Auswahl von Kurvenfunktionen, welche den maximalen Korrelationskoeffizienten aufweist, durchgeführt.  
20 Der Krümmungsverlauf einer derart angepassten Kurve muss nicht zwingend mit dem der Datenbasis übereinstimmen. Der Korrelationskoeffizient  $r$  (maximaler Wert = 1, minimaler Wert = - 1) ist als Anpassungsgütekriterium nur bedingt brauchbar, da dieser Wert nicht nur von der Anpassungsgüte  
25 der angewendeten Kurvenfunktion abhängt, sondern auch von der Steigung der verwendeten Kurvenfunktion. Läuft die Steigung z.B. einer linearen Anpassung gegen null, folgt dieser Tendenz auch  $r$ , unabhängig von der Streuung der einzelnen Kurvenpunkte.  
30 Somit ist  $r$  als Gütemaß für eine Extrapolation nicht brauchbar.

Werkzeuge zur Generierung für die Bewertung der Betriebsbedingungen einer Maschine oder Anlage müssen  
35 bestimmte Mindestanforderungen erfüllen, damit eine Bewertung des Extrapolationsergebnisses hinsichtlich der

- Vorhersagezuverlässigkeit

- Einflussgrößen auf eine Vorhersagesicherheit
- Nachvollziehbarkeit der Vorhersage möglich ist.

- 5 Naturgemäß ist jede Vorhersage mit Unsicherheiten behaftet und deren Gütemaß zur Beurteilung von prognostizierten Alarmen/Grenzwertüberschreitungen sowie als Entscheidungsbasis für daraus resultierende bspw. automatisierte Aktionen außerordentlich wichtig.
- 10 Darüber hinaus kann bei einem zyklisch generierten Verfahren zur Bewertung der Betriebsbedingungen einer Maschine oder Anlage eines bestimmten, z.B. messtechnischen Zusammenhangs die zeitliche Entwicklung eines Gütemaßes wiederum als Trend betrachtet werden und damit zusätzliche Aufschlüsse über den
- 15 Eintreffzeitpunkt des prognostizierten Ereignisses, z.B. einer Grenzwertüberschreitung, geben, um eine Betriebssicherheit der Maschine oder der Anlage zu gewährleisten.
- Die Einschätzung der Zuverlässigkeit einer Extrapolation
- 20 besitzt zentrale Bedeutung, da Bewertungen von Schadenssymptomen, Grenzwertüberschreitungen und Betriebsoptimierungen, z.B. Ersatz von Verbrauchsteilen, ohne Kenntnis der Vorhersagezuverlässigkeit, also des Gütemaßes kaum möglich sind.
- 25 Eine Bewertung der Betriebsbedingungen einer Maschine oder einer Anlage, bei dem ein Trend der weiteren Entwicklung von Parametern analysiert wird, ist sehr wichtig im Zusammenhang mit Problemlösungen bei Aufgabenstellungen wie
- 30 Betriebsmonitoring oder Systemanalyse.
- Diese Verfahren werden überall dort eingesetzt, wo Extrapolationen in unbekannte Wertebereiche aus bekannten Gesetzmäßigkeiten heraus von Bedeutung sind, also im wesentlichen bei Ereignisprediktionen (Erkennung zukünftiger
- 35 Alarme/Überschreitung von Belastungsgrenzen) und Schadenspräventionen (Erkennung zukünftiger Schäden).

Ähnlich wie bei Messwerten, diese sind ohne Angabe der Messtoleranz praktisch wertlos, muss einer Extrapolation eine Größe zugeordnet werden, welche Aufschluss über die Vorhersagequalität (Gütemaß) gibt. Ohne diese Information sind Extrapolationsergebnisse kaum bewertbar und daher Entscheidungen zu Folgeaktionen (z.B. Prozesseingriffe) höchst unsicher und u.U. kontraproduktiv.

10

Es ist daher Aufgabe der Erfindung dieses Problem zu beheben.

15

Die Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäss Anspruch 1 gelöst.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen aufgelistet.

20

25

Die optimale Anpassung der Extrapolationsfunktion an die Datenbasis erfolgt nicht durch einen maximalen Korrelationskoeffizienten  $r$ , sondern mit Hilfe eines Gütemaßes  $K$ , welches von der Steigung einer Anpassungskurve an eine Datenbasis unabhängig ist.

Aus mindestens zwei verschiedenen Unterkriterien wird das Gütemaß  $K$  berechnet, welches Aufschluss über die Vorhersagequalität der Extrapolation erteilt.

30

Die Existenz von  $K$  ermöglicht zumindest zwei Extrapolationsmodi:

- Vorgabe eines konstanten Gütemaßes  $K$

35

In diesem Falle ist die Extrapolationsweite, d.h. der Abstand zwischen dem letzten Wert der Datenbasis und einem Endpunkt der Extrapolation, variabel.

Diese Vorgehensweise ist wichtig bei der Unterdrückung von Fehl- oder unbedeutenden Alarmen.

Hier kann einem Operateur einer technischen Anlage mitgeteilt werden, über welchen Zeitraum kein Alarm auftreten wird, d.h. eine bestimmte Betriebssicherheit gegeben ist.

- Vorgabe einer Extrapolationsweite (z.B. bei Grenzwertüberschreitung)

In diesem Falle ist  $K$  variabel. Die zeitliche Entwicklung von  $K$  kann wiederum als Basis für eine Trendanalyse benutzt werden, um den wahrscheinlichen Eintreffzeitpunkt des Ereignisses bei  $K = 1$  abzuschätzen.

Trendanalysen, um die Betriebsbedingungen einer Maschine oder Anlage zu bewerten, können ganz allgemein die Entwicklung zweier korrelierter Größen in noch unbekannte Wertebereiche extrapolieren.

Ihre Anwendung kann sowohl auf zeitliche Entwicklungen

$$y_i = f(t_i); \quad i = 1 \dots n$$

Beispiel:  $P_{el} = f(t); \quad P_{el} = \text{Generatorleistung}$

und auf formal zeitunabhängige Zuordnungen

$$y_{1i} = f(y_{2i}); \quad i = 1 \dots n, \quad y_1 \text{ mit } y_2 \text{ synchron}$$

Beispiel:  $P_{el} = f(\text{Brennstoffmassenstrom})$

angewendet werden.

Der Einsatz von Trendanalysen unterstellt allerdings implizit, dass sich die aus der Vergangenheit ableitbare Gesetzmäßigkeit der Entwicklung zweier korrelierter Größen auch in der Zukunft fortsetzt und sich auf diese Weise noch unbekannte Wertezuordnungen generieren lassen.

Diese Bedingung setzt für sinnvolle Trendanalysen voraus, dass diese nur mit Verläufen generiert werden können, welche unter identischen (,normalisierten') Randbedingungen -

physikalische Umweltbedingungen, Brennstoff, Leistung, Betriebsmodus Brenner usw. - generiert wurden.

Die Bereitstellung solch normalisierter Wertezuordnungen kann entweder durch Datenselektion mit Hilfe logischer Bedingungen (Diskrete Normalisierung) oder mit Hilfe eines Prozesssimulationsmodells (analytische Normalisierung) erfolgen, welches z. B. alle umgebungsabhängigen Werte auf ISO-Bedingungen zurückrechnen kann.

10

Es zeigen:

Figur 1 eine Datenbasis und Extrapolationskurve,

Figur 2 Kurven zur Bestimmung von  $\Delta I$

Figur 3 eine Segmentierung einer Datenbasis,

15 

Figur 4 einen zeitlichen Verlauf von K,

Figur 5 eine Turbine mit Bauteilen,

Figur 6 in vereinfachter Darstellung einen Längsschnitt einer Turbine, und

Figur 7 eine Turbinenschaufel als ein Bauteil.

20

Basisgrößen zur Berechnung zum Gütemaß K

Das Gütemaß K ist ein Maß für die Güte einer Extrapolation.

25 

Sie verknüpft mehrere Fehlereinflüsse und ist daher eine Funktion zumindest zweier Variabler z. B. V,  $\Delta I$ .

In diesem Falle sind dies bspw. ein Verhältnis V, eine x-Unschärfe  $\Delta I$ , eine Stetigkeit S und eine zeitliche Konstanz C:

30

$$K = f(V, \Delta I, S, C).$$

Diese Größen werden bspw. so verknüpft, dass sich der Wertevorrat von K innerhalb eines normierten Bereiches, z.B. 0% bis 100% befindet.

35

- Verhältnis  $V$  des Datenbereiches zum Extrapolationsbereich

Für die Extrapolation stehen  $n$  Messpunkte  $(x_1, y_1)$  bis  $(x_n, y_n)$  zur Verfügung. Es müssen jedoch nicht alle vorhandenen

5 Messpunkte 15 eines Datenvorrats 54 (Fig. 3) verwendet werden.

Das Verhältnis  $V$  setzt bspw. den  $x$ -Wertebereich  $(x_n - x_1)$  der zur Extrapolation verwendeten Datenbasis 6 in das Verhältnis der Strecke  $x_1$  bis zur  $x$ -Position des verwendeten

10 Extrapolationspunktes  $x_s$  (Fig.1), d.h. dem

Extrapolationsbereich 9, in ein Verhältnis, welches bspw. maximal gegen den Wert 1, d.h. die Datenbasis 6 ist gleich dem Extrapolationsbereich, und minimal gegen den Wert 0, d.h. die Datenbasis 6 ist sehr klein gegenüber dem

15 Extrapolationsintervall, strebt.

$x_s$  ist z.B. ein Wert, bei der eine Grenzwertüberschreitung ( $y_s = \text{Grenzwert } 18$ ) stattfindet.

In Figur 1 ist ebenfalls eine Anpassungsfunktion 12 an die Datenbasis 6 gezeigt, die auch die Extrapolation bis zum  $x$ -  
20 Punkt  $x_s$  ergibt.

$V$  wird bspw. wie folgt berechnet:

$$V = (x_n - x_1) / (x_s - x_1).$$

25

Trägt  $V$  wesentlich zu einer Reduzierung des Gütemaßes  $K$  bei, kann schrittweise die Datenbasis der Extrapolation erweitert werden.

- 30 • Unschärfe  $\Delta I$  der Anpassungskurve in  $x$ -Richtung

Jede Kurvenanpassung (Voraussetzung zur Extrapolation) besitzt naturgemäß auch eine Unschärfe (Vertrauensbereich) der berechneten Kurvenparameter.

35 Um die Unschärfe der Steigung zu bestimmen, wird in der Figur 2 bspw. eine lineare Regressionsfunktion 21 verwendet.

Generell können als Extrapolationsfunktionen alle Funktionen

verwendet werden, welche sich in lineare Strukturen überführen lassen, also

- |   |                                  |   |                                     |
|---|----------------------------------|---|-------------------------------------|
|   | Lineare Funktion (Stammfunktion) | → | $y = a_0 + a_1 \cdot x$             |
|   | Potenzfunktion                   | → | $\ln y = \ln a_0 + a_1 \cdot \ln x$ |
| 5 | Logarithmische Funktion          | → | $y = a_0 + a_1 \cdot \ln x$         |
|   | Exponentielle Funktion           | → | $\ln y = \ln a_0 + a_1 \cdot x$     |
|   | u.a..                            |   |                                     |

Die Unschärfe  $\Delta I$  wird dann wie folgt berechnet.

- 10 Figur 2 zeigt eine beispielhafte Datenbasis 6 mit einer Extrapolationskurve 21 und mit weiteren Kurven 24, 27 zur Berechnung von  $\Delta I$ .

- 15 Die Unschärfe  $\Delta I$  kann durch Drehung der Anpassungskurve 21 (in linearer Darstellung) um einen Drehpunkt  $(\bar{x}, \bar{y})$  dargestellt werden. Die Mittelwerte  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind bspw. durch geometrische oder arithmetische Mittel bestimmt worden. Der Punkt  $(\bar{x}, \bar{y})$  muss nicht zwingend auf der linearen Anpassungskurve 21 (Extrapolationskurve) liegen.

- 20 Die Unschärfe einer Steigung der linearen Kurve 21 entspricht einer Winkeldrehung, bei der die Steigung  $m$  um  $\pm \Delta m$  variiert wird und damit einer  $x$ -Unschärfe  $\Delta I$  der Anpassungskurve u.a. in  $x$ -Richtung (Fig. 2).

- 25 Durch die Variation der Steigungen ergeben sich zwei weitere Kurven 24, 27, die mit einer Parallelen 18 ( $y_s = \text{konstant}$ ), die einem Grenzwert entspricht, jeweils einen Schnittpunkt 30, 33 bilden. Zu jedem Schnittpunkt 30, 33 gibt es einen entsprechenden  $x$ -Wert  $I_{\max}$  und  $I_{\min}$ , wobei  $I_{\max} > I_{\min}$  ist und  $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$ .

- 30 Diese  $x$ -Unschärfe korreliert mit einem Schnittwinkel  $\alpha$ , der sich bestimmt aus dem Winkel zwischen der Parallelen 18 und der Kurve am Schnittpunkt der Extrapolationskurve 21 und der Parallelen 18. Die  $x$ -Unschärfe  $\Delta I$  verstärkt sich mit abnehmendem Schnittwinkel  $\alpha$ .

- 35 Ist bei einer Extrapolation kein Grenzwert vorhanden bzw. wird keiner überschritten, gilt das oben gesagte für den vorgegebenen  $x$ -Endpunkt ( $x_g$ ) der Extrapolation und einer

gedachten Parallelen zur x-Achse, welche durch den Punkt  $(x_S, y_S)$  läuft.

- Da die Extrapolationsfunktion immer analytisch vorliegt, kann mit Hilfe der ersten Ableitung der Schnittwinkel  $\alpha$  zwischen
- 5 einer Waagerechten oder Alarmfunktion und der Extrapolationsfunktion berechnet werden.

Der Ansatz zur Berechnung der Steigungsunschärfe  $\pm \Delta m$  ist bspw. wie folgt:

- 10 Eine Steigung  $b$  wird mittels eines Konfidenzintervalls bestimmt. Ein solches Verfahren ist aus Kreyszig, Erwin: "Statistische Methoden und ihre Anwendungen", Verlag Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, Seite 270 bekannt.
- 15 Zur Bestimmung der Steigung  $b$  wird wie folgt vorgegangen:
- a) Eine Datenbasis 6 wird festgelegt. Die Datenbasis 6 umfasst  $n$  korrelierte  $x$ - und  $y$ -Werte (Fig. 2)
  - 20 b) Berechnung von  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  der Datenbasis 6 sowie der Größe  $\sum x_i y_i$
  - c) Berechnung von  $s_{xy} = \frac{1}{n-1} (\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y})$  ( $i=1..n$ )
  - d) Berechnung von  $s_x^2 = \frac{1}{n-1} (\sum x_i^2 - n \bar{x}^2)$  ( $i=1..n$ )
  - e) Berechnung von  $s_y^2 = \frac{1}{n-1} (\sum y_i^2 - n \bar{y}^2)$  ( $i=1..n$ )
  - 25 f) die Steigung  $b$  ergibt sich aus  $b = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$
  - g) Berechnung von  $a = (n-1) (s_y^2 - b^2 s_x^2)$

Somit ergibt sich die Gleichung der Regressionsgeraden 21

30  $y = \bar{y} + b(x - \bar{x})$ .

Als nächstes wird eine Konfidenzzahl von bspw. 95%



vorgegeben, d.h.  $\gamma = 0,95$ , woraus eine Grösse  $F(c)$  berechnet wird:

$$h) F(c) = \frac{1}{2}(1+\gamma) = 0,975$$

- 5 i) mit  $F(c) = 0,975$  und  $n-2$  ( $n$  = Anzahl Messwerte) Freiheitsgrade liefert die t-Verteilung (Student-Verteilung) einen Wert  $c$  ( $0,975$  entspricht dem Integral der t-Verteilung bis an die Stelle  $x=c$ ).

10  $\Delta m$  ergibt sich aus

$$j) \frac{c\sqrt{a}}{s_x \sqrt{(n-1)(n-2)}}.$$

Somit ergibt sich eine Unschärfe der Steigung  $m$ :

15  $b - \Delta m \leq m \leq b + \Delta m.$

Berechnet wird damit die x-Unschärfe  $\Delta I$  der Steigung  $m$  im Drehpunkt (Fig. 2) in Abhängigkeit der Streuungskenngrößen der aktuellen Datenbasis 6.

- 20 Damit ist  $\Delta I = f(\Delta m, \alpha)$  mittels Strahlensatz oder Goniometrie berechenbar.  
Eine Normierung von  $\Delta I$  kann ebenso erfolgen.

- 25 • Stetigkeit  $S$  der  $y$ -Werte der Datenbasis

Eine Segmentierung einer Datenbasis 6 erteilt vorab Aufschluss über die aktuelle Krümmungsrichtung der verwendeten Datenbasis 6.

- 30 Die Datenbasis 6 ist eine echte oder unechte Teilmenge eines Datenvorrats 54, der alle verfügbaren Messpunkte 15 umfasst.

- Eine Segmentierung bedeutet, dass Messpunkte, also Zahlentupel  $(x,y)$  der Datenbasis 6 in zumindest drei  
35 Segmente 45, 48, 52 aufgeteilt werden. Für jedes Segment

44, 48, 52 wird eine lineare Anpassungskurve 36, 39, 42 bestimmt.

Die Krümmungsrichtung der Datenbasis 6 wird durch Bildung von Segmentmittelwerten  $g_1$ ,  $g_2$  und  $g_3$  und Berechnung der zweiten numerischen Ableitung bestimmt.

Bei diesem Verfahren kann davon ausgegangen werden, dass die Berechnung der Anpassungskurve (Extrapolationskurve) zyklisch aus einer gleitenden Datenbasis 6 erfolgt, d.h. ein Datenfenster 3 (Fig. 3) konstanter oder variabler Länge wird nach jedem abgeschlossenen Extrapolationszyklus in Richtung zunehmender x-Größen um ein jeweils vorgegebenes Intervall  $\Delta x$  (unabhängige Variable) verschoben.

In der Praxis kann der Vorschub  $\Delta x$  des Datenfensters 3, d.h. der Datenbasis 6, maximal in dem zeitlichen Zyklus erfolgen, mit welchem neue Messwerte 15 generiert werden (z.B.  $\Delta x = 5 \text{ s}$ ).

Der Begriff der Stetigkeit S ist in diesem Zusammenhang nicht als mathematische Definition zu verstehen, sondern als das Maß der Veränderung des Punktverlaufes der Datenbasis 6 in Relation zum letzten abgeschlossenen Extrapolationsschritt.

Um eine Aussage über die Stetigkeit der Y-Werteentwicklung und damit implizit eine Aussage über die Extrapolationsfähigkeit der Entwicklung machen zu können, wird das Datenfenster 3 (Fig. 3) in mindestens drei Segmente 45, 48, 52 unterteilt. Für jedes Segment 45, 48, 52 wird in einem Zwischenschritt je ein Mittelwert und je eine lineare Anpassungsfunktion  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  mit den Steigungen  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  berechnet (Fig. 3).

Bezeichnet man die Mittelwerte der drei Regressionsgeraden 36, 39, 42 mit  $g_1$ ,  $g_2$  (mittleres Segment) und  $g_3$ , so kann mit dem numerischen Krümmungsmaß  $p$

$$p = g_1 - 2 \cdot g_2 + g_3$$

die aktuelle Krümmungsrichtung des Steigungsverlaufes bestimmt werden.

Im Beispiel von Figur 3 ist  $q$  negativ. Dies bedeutet eine Rechtskrümmung.

Bei  $p = 0$  liegen die drei Mittelwerte auf einer Geraden. Aus einem Kurvenvorrat wird iterativ jener Kurventyp dem Wertebereich der gesamten aktuellen Datenbasis angepasst.

Anpassungsfunktionen (Regressionsfunktionen) des Kurvenvorrats für die Extrapolationskurve von Datenkorrelationen müssen die Bedingung des monotonen Verlaufes erfüllen, da nicht-monotone Funktionen zu erheblichen Extrapolationsunsicherheiten führen können. Generell sind alle Funktionen verwendbar, welche in lineare Strukturen der Form  $y = a_0 + a_1 \cdot x$  überführbar sind, also

Lineare Funktion (Stammfunktion)	$\rightarrow f(x)=y = a_0 + a_1 \cdot x$
Potenzfunktion	$\rightarrow f(x)=\ln y = \ln a_0 + a_1 \cdot \ln x$
Logarithmische Funktion	$\rightarrow f(x)=y = a_0 + a_1 \cdot \ln x$
Exponentielle Funktion	$\rightarrow f(x)=\ln y = \ln a_0 + a_1 \cdot x$
u.a..	

Der aus dem Kurvenvorrat ausgewählte Kurventyp muss folgende Bedingungen erfüllen:

die Krümmungsrichtung der Extrapolationskurve (Regressionsgeraden) muss mit der von  $p$  übereinstimmen

der Quotient  $Q_k$  aus Zähler = (ggf. gewichteter) Mittelwert der Abstandsquadrat zwischen Messwerten und Extrapolationskurve, und Nenner = Mittelwertquadrat des  $y$ -Wertebereiches der Extrapolationskurve im Bereich des Datenfensters (dabei ist beispielsweise  $y_{\text{mitt}_k}^2 = [(y_{\text{max}_k} + y_{\text{min}_k})/2]^2$ , wobei  $y_{\text{max}}$  der maximale  $Y$ -Wert ist und  $y_{\text{min}}$  entsprechend der minimale  $Y$ -Wert der  $k$ -ten Kurve) und dient zur Normierung) muss minimal sein:

$$Q_k = f(k) = \frac{\sum_{i=1}^{12} w_i * (y_i(x_i) - f_k(x_i))^2}{y_{\min}^2 * \sum w_i} = \min \quad (i = 1..12).$$

k ist dabei ein Zähler der verfügbaren  
Extrapolationskurventypen (Kurvenvorrat).

5  $y_i(x_i)$  ist der Messwert an der Stelle  $x_i$ .

$f_k(x_i)$  ist der Funktionswert des k-ten  
Extrapolationskurventyps an der Stelle  $x_i$ .

$w_i$  ist ein Wichtungsfaktor für jeden einzelnen Messwert oder  
für alle Messwerte eines Segments.

10

Die Bewertung der Stetigkeit S wird wie folgt vorgenommen:

Vergleich der drei Geradensteigungen  $C_1, C_2, C_3$  mit den  
Steigungen der Extrapolationskurve an den jeweiligen  
Mittenpositionen ( $X_{s1}, X_{s2}, X_{s3}$ ) der drei Segmente des

15 Datenfensters. Eine unterschiedliche Wichtung der drei  
Steigungsdifferenzen ist hier möglich und sinnvoll. So können  
die aktuelleren Werte im letzten Segment stärker bewertet  
werden, um schneller eine Veränderung des Kurvenverlaufs zu  
erkennen.

20 Die drei Steigungsdifferenzen sind ein Maß für die  
Entwicklungsstetigkeit des Kurvenverlaufes.

S berechnet sich wie folgt:

$O_1$  bis  $O_3$  sind die drei Steigungen der ausgewählten k-ten

25 Anpassungskurve 36, 39, 42 an den jeweils halben  
Segmentsbreiten,

$C_1$  bis  $C_3$  die Steigungen der linearen Segmentsanpassungen  
(Fig. 3).

30 Somit gilt:

$$S = \frac{\sum \gamma_i * (C_i - O_i)^2}{\sum \gamma_i}; \quad i = 1...3 \text{ (Segmentbereiche)}$$

mit  $\gamma_i$ : Wichtungsfaktoren 1...n.

Der Wertebereich von  $S$  ist wie folgt: 0 (abs. Stetigkeit),  
 d.h. die Steigungen der Extrapolationsfunktion in den  
 Segmentmitten sind identisch mit den Regressionsgeraden der  
 5 einzelnen Segmente 45, 48, 52 bis  $+\infty$ , d.h. keine  
 Übereinstimmung der Steigungen.

- Zeitliche Konstanz  $C$  der Extrapolationen

10

Die zeitliche Varianz einer Folge von Extrapolationen ist ein  
 zusätzlicher und wichtiger Indikator der  
 Vorhersagesicherheit, da hohe Varianzbeträge z.B. des  
 Gütemaßes von instabilen Extrapolationsbedingungen und daher  
 15 fragwürdiger Aussagekraft zeugen können.

Die Abfrage der zeitlichen Konstanz einer Extrapolation kann  
 bei Vorgabe eines festen Gütemaßes mit der variablen  
 Extrapolationsweite ( $x_s$ ) oder bei Fixierung der  
 Extrapolationsweite - z. B. kann  $x_s$  der Überschreitung eines  
 20 festen Grenzwertes entsprechen - über die dann variable  
 Konfidenzzahl erfolgen.

Figur 4 zeigt einen beispielhaften zeitlichen Verlauf des  
 Gütemaßes  $K(t)$  mit verschiedenen Werten 58. Für diesen  
 Werteverlauf wird eine Anpassungsfunktion  $q$  aus einem  
 25 Kurvenvorrat ermittelt.

Die Berechnung der jeweiligen Variablen erfolgt iterativ z.B.  
 mit dem Newton-Verfahren.

Die zeitliche Varianzüberwachung erfolgt mit Hilfe eines  
 Regressionsfits (bspw. durch ein Polynom 1 oder höherer  
 30 Ordnung, wobei die Ordnung abhängig ist von  $n$ ) an die jeweils  
 letzten  $n$  (z.B.  $n=10$ ) zeitlichen Werte von  
 Extrapolationsweiten bzw. Konfidenzzahlen. Auf diese Weise  
 können auch sich zeitlich linear verändernde Werte der zu  
 testenden Variablen präzise in ihrer Variabilität bewertet  
 35 werden.

Die Bewertung der zeitlichen Varianz von Extrapolationsweite  
 wird wie folgt berechnet:

$$C = \frac{\sum \gamma_i * (K(t_i) - q(t))^2}{q_{\text{mitt}_k}^2 * \sum \gamma_i}$$

i = Anzahl der Iterationen.

5

Auch hier können Wichtungsfaktoren  $\gamma_i$  die aktuellsten Werte anders/höher bewerten als die ältesten.

Dabei entspricht  $q_{\text{mitt}_k}^2$   $Y_{\text{mitt}_k}^2$ .

Der Wertebereich von C liegt zwischen C= 0 (keine zeitliche Streuung der Variablen, alle Variablenpunkte liegen auf der Regressionsgeraden) und  $+\infty$  (Variablenfolge verrauscht).

15

- Verknüpfung von V,  $\Delta l_{\text{norm}}$ , S und C zum Gütemaß K

Das Gütemaß K verknüpft die Größen V,  $\Delta l_{\text{norm}}$ , S und C bspw. wie folgt:

$$K = \frac{V * \Delta l}{S * C} .$$

20

Der Wertebereich von K liegt zwischen 0 (Extrapolation verwerfen) und  $+\infty$  (Extrapolation exakt).

Eine Normierung von K kann z.B. über eine nichtlineare Beziehung erfolgen:

25

$$K_{\text{norm}} = 1 - e^{-K} .$$

35

Bspw. ist die Anlage ein Rotor einer Gasturbine. Durch die Ermittlung von K des Parameters Frequenz des Rotors wird festgestellt, dass in einer bestimmten Zeit ( $x_s - x_n$ ) eine unzulässige Grenzwertwertüberschreitung stattfinden wird. Daher wird die Frequenz runtergeregelt.

Figur 5 zeigt schematisch in einem Längsschnitt eine  
5 Gasturbine 1.

Als ein beispielhaftes Bauteil ist eine Gasturbine 1  
ausgewählt für eine Maschine, bei der Parameter wie  
Temperatur, Schwingung, elektrische Leistung oder sonstiges  
10 Parameter gemessen werden.  
Entlang einer Welle 4 sind ein Verdichter 7, eine Brennkammer  
10 und ein Turbinenteil 13 hintereinander angeordnet.  
Das Turbinenteil 13 weist einen Heißgaskanal 16 auf. Im  
Heißgaskanal 16 sind Gasturbinenschaufeln 20 angeordnet.  
15 Leitschaufel- und Laufschaufelgrenze sind wechselnd  
aufeinanderfolgend vorgesehen.  
Die Gasturbinenschaufeln 20 werden beispielsweise über eine  
kombinierte Luft- und/oder Dampfkühlung gekühlt. Dazu wird  
beispielsweise dem Verdichter 7 Verdichterluft entnommen und  
20 über eine Luftzuführung 23 den Gasturbinenschaufeln 22  
zugeführt. Über eine Dampffzuführung 26 wird den  
Gasturbinenschaufeln 20 beispielsweise auch Dampf zugeführt.

25 In Figur 6 ist in vereinfachter Darstellung in einem  
Längsschnitt ein Ausschnitt eines Turbinenteils 13 gezeigt.  
Das Turbinenteil 13 weist eine Welle 4 auf, die sich entlang  
einer Rotationsachse 41 erstreckt.  
Weiter weist das Turbinenteil 13 entlang der Rotationsachse  
30 41 aufeinanderfolgend ein Einströmbereich 49, ein  
Beschaufelungsbereich 51 sowie ein Abströmbereich 53 auf.  
In dem Beschaufelungsbereich 51 sind rotierbare Laufschaufeln  
20 und feststehende Leitschaufeln 20 angeordnet. Die  
Laufschaufeln 20 sind dabei an der Welle 4 befestigt, während  
35 die Leitschaufel 20 an einem die Welle 4 umgehenden  
Leitschaufelträger 47 angeordnet sind.

Durch die Welle 4, den Beschaukelungsbereich 51 sowie den Leitschaufelträger 47 ist ein ringförmiger Strömungskanal für ein Strömungsmedium A, z.B. Heißdampf, gebildet.

Der zur Zufuhr des Strömungsmediums A dienende

- 5 Einströmbereich 49 wird durch ein stromaufwärts des Leitschaufelträgers 47 angeordnetes Einströmgehäuse 55 in radialer Richtung begrenzt.

Ein Abströmgehäuse 57 ist stromabwärts am Leitschaufelträger 47 angeordnet und begrenzt den Abströmbereich 53 in radialer

- 10 Richtung, dass heißt senkrecht zur Rotationsachse 41.

Während des Betriebs der Gasturbine 1 strömt das

Strömungsmedium A von dem Einströmbereich 49 in den Beschaukelungsbereich 51, wo das Strömungsmedium unter

Expansion Arbeit verrichtet, und verlässt danach über den

- 15 Abströmbereich 53 die Gasturbine 1. Das Strömungsmedium A wird anschließend in einen dem Abströmgehäuse 57 nachgeschalteten in der Figur 5 nicht näher dargestellten Kondensator für eine Dampfturbine gesammelt.

- 20 Beim Durchströmen des Beschaukelungsbereichs 51 entspannt sich das Strömungsmedium A und verrichtet Arbeit an den Laufschaufeln 20, wodurch diese in Rotation versetzt werden.

- 25 Figur 7 zeigt in perspektivischer Ansicht eine Laufschaufel 20, die sich entlang einer radialen Achse 60 erstreckt.

Die Laufschaufel weist entlang der Radialachse 60

aufeinanderfolgend einen Befestigungsbereich 63, eine daran angrenzende Schaufelplattform 66 sowie ein

- 30 Schaufelblattbereich 69 auf.

Im Befestigungsbereich 63 ist ein Schaufelfuß 72 gebildet,

der zur Befestigung der Schaufel 20 an der Welle 4 einer

Gasturbine 1 dient. Der Schaufelfuß 72 ist beispielsweise als Hammerkopf ausgestaltet.

- 35 Bei herkömmlichen Laufschaufeln 20 werden in allen Bereichen 63, 66, 69 massive metallische Werkstoffe verwendet. Die Laufschaufel 20 kann hierbei durch ein Gussverfahren, durch



ein Schmiedeverfahren, durch ein Fräsverfahren oder Kombinationen daraus gefertigt sein. Dabei weist das Bauteil vielfach bereits unmittelbar nach der Herstellung Fehler auf.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Bewertung der Betriebsbedingungen einer Maschine (1) oder Anlage,  
5 für die mindestens ein Parameter mehrfach gemessen wird, um eine Datenbasis (6) zu bilden, die aus Werten  $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$  des Parameters besteht, wobei ein Gütemaß (K) einer Extrapolation auf Grundlage der Datenbasis (6) berechnet wird,  
10 bei dem das Gütemaß (K) eine Funktion von mindestens zwei Variablen der Gruppe V,  $\Delta I$ , S, C ist, wobei (V) ein Verhältnis des Wertebereichs der Datenbasis (6) zum Extrapolationsbereich  $x_s$  ist, der bestimmt ist durch  $x_s > x_1, x_n$ ,  
15 wobei ( $\Delta I$ ) die x-Unschärfe der Anpassungskurve (21) in x-Richtung ist, wobei (S) die Stetigkeit als ein Maß der Veränderung der y-Werte der Datenbasis (6) und  
20 (C) die zeitliche Konstanz der Extrapolation ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass  
25 die Bewertung der Betriebsbedingungen genutzt wird, um in Abhängigkeit des Gütemaßes (K) entsprechend den Parameter zu beeinflussen.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,  
30 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass  
durch die Bewertung der Betriebsbedingungen die Betriebssicherheit der Maschine (1) oder der Anlage erhöht wird, indem in Abhängigkeit des Gütemaßes (K) der  
35 Parameter entsprechend beeinflusst wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

5 die Bewertung der Betriebsbedingungen für eine Optimierung  
des Betriebs der Maschine (1) oder der Anlage verwendet  
wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3,

10 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

für den Parameter einen Grenzwert (18) vorgegeben wird,  
und dass ein Zeitraum ermittelt wird,  
in dem keine Überschreitung des Grenzwertes (18) des  
15 Parameters auftritt.

6. Verfahren nach Anspruch 1,

20 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

die Auswahl der Variablen in der Weise getroffen wird,  
dass das Gütemaß (K) von der Steigung einer  
Anpassungskurve an die Datenbasis (6) unabhängig ist.

25

7. Verfahren nach Anspruch 1,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

das Gütemaß (K) normiert ist, insbesondere durch  $1-e^{-K}$ .

30

35 8. Verfahren nach Anspruch 7,

dadurch gekennzeichnet, dass

das Gütemaß (K) auf einen Wertebereich von 0 bis 100 % normiert wird.

- 5 9. Verfahren nach Anspruch 1,  
 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass  
 das Gütemaß (K) gegeben ist durch:

10 
$$K = \frac{V * \Delta I}{S * C}.$$

10. Verfahren nach Anspruch 1 oder 9,  
 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass  
 15 das Verhältnis (V) des Wertebereichs der Datenbasis (6)  
 gegeben ist durch  $(X_n - X_1) / (X_s - X_1)$ .

- 20 11. Verfahren nach Anspruch 1,  
 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass  
 die Datenbasis (6) in mindestens drei Segmente (45, 48,  
 52) unterteilt wird;  
 25 dass für jedes Segment (45, 48, 52) aus der Datenbasis (6)  
 je ein Mittelwert  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  und je eine lineare  
 Anpassungsfunktion  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  (36, 39, 42) mit den  
 Steigungen  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  berechnet wird;  
 dass ein numerisches Krümmungsmaßes  $p$   
 30 
$$p = g_1 - 2 * g_2 + g_3,$$
  
 berechnet wird,  
 das die aktuelle Krümmungsrichtung des Steigungsverlaufes  
 wiedergibt;  
 dass aus einem Kurvenvorrat von Kurventypen zumindest der  
 35 Gruppe:

Lineare Funktion  $\rightarrow f(x)=y = a_0 + a_1 \cdot x$   
 Potenzfunktion  $\rightarrow f(x)=\ln y = \ln a_0 + a_1 \cdot \ln x$   
 Logarithmische Funktion  $\rightarrow f(x)=y = a_0 + a_1 \cdot \ln x$   
 Exponentielle Funktion  $\rightarrow f(x)=\ln y = \ln a_0 + a_1 x$

5 iterativ jener Kurventyp der Anpassungsfunktion ausgewählt  
 und dem Wertebereich der gesamten aktuellen Datenbasis (6)  
 angepasst wird,  
 wobei der aus dem Kurvenvorrat ausgewählte Kurventyp  
 folgende Bedingungen erfüllen muss:

10 die Krümmungsrichtung der Kurve, die aus der Extrapolation  
 ermittelt wird,  
 muss mit der von p übereinstimmen

15 und

der Quotient  $Q_k$  aus Zähler (= ggf. gewichteter Mittelwert  
 der Abstandsquadrat zwischen Messwerten und  
 Extrapolationskurve) und Nenner (= Mittelwertquadrat des  
 20 y-Wertebereiches der Extrapolationskurve im Bereich des  
 Datenfensters) muss minimal sein:

$$Q_k = f(k) = \frac{\sum w_i \cdot (y_i(x_i) - f_k(x_i))^2}{y_{\text{mitt}_k}^2 \cdot \sum w_i} = \min \quad (i = 1..min)$$

25 wobei k ein Zähler der verfügbaren Kurventypen  
 (Kurvenvorrat) für die Extrapolation ist,  
 insbesondere ist  $y_{\text{mitt}_k}^2 = [(y_{\text{max}_k} + y_{\text{min}_k})/2]^2$ ,  
 wobei  $y_i(x_i)$  der Messwert an der Stelle  $x_i$  ist,  
 wobei  $f_k(x_i)$  der Funktionswert des k-ten Kurventyps für  
 30 die Extrapolation an der Stelle  $x_i$  ist,  
 wobei  $w_i$  ein Wichtungsfaktor für jeden einzelnen Messwert  
 oder für alle Messwerte eines Segments ist;  
 so dass die Stetigkeit (S) sich wie folgt berechnet:

35 
$$S = \frac{\sum \gamma_i \cdot (C_i - O_i)^2}{\sum \gamma_i};$$

wobei  $i = 1 \dots 3$  eine Numerierung für die Segmentbereiche ist,

wobei  $\gamma_i$ : Wichtungsfaktoren  $1 \dots n$ ,

5 wobei  $O_1$  bis  $O_3$  die Steigungen der ausgewählten k-ten Kurve (36, 39, 42) für die Extrapolation an den jeweils halben Segmentbreiten sind, und  
wobei  $C_1$  bis  $C_3$  die Steigungen der linearen Segmentsanpassungen sind.

10

12. Verfahren nach Anspruch 1,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

15 die x-Unschärfe wie folgt bestimmt wird:

Auswahl einer Extrapolationsfunktion, welche sich in lineare Strukturen überführen lässt, also

zumindest aus der Gruppe

Lineare Funktion

$$\rightarrow y = a_0 + a_1 \cdot x$$

20

Potenzfunktion

$$\rightarrow \ln y = \ln a_0 + a_1 \cdot \ln x$$

Logarithmische Funktion

$$\rightarrow y = a_0 + a_1 \cdot \ln(x)$$

Exponentielle Funktion

$$\rightarrow \ln y = \ln a_0 + a_1 \cdot x,$$

ausgewählt wird,

Festlegung einer Datenbasis (6),

25

wobei die Datenbasis (6) n korrelierte x- und y-Werte umfasst

Berechnung von  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  der Datenbasis (6) sowie der Größe  $\sum x_i y_i$

$$\text{Berechnung von } s_{xy} = \frac{1}{n-1} (\sum x_i y_i - \overline{nx y}) \quad (i=1..n)$$

30

$$\text{Berechnung von } s_x^2 = \frac{1}{n-1} (\sum x_i - \bar{x})^2 \quad (i=1..n)$$

$$\text{Berechnung von } s_y^2 = \frac{1}{n-1} (\sum y_i - \bar{y})^2 \quad (i=1..n)$$

Berechnung einer Steigung  $b = \frac{S_{xy}}{S_x^2}$

Berechnung von  $a = (n-1)(s_y^2 - b^2 s_x^2)$ ,

5 Bestimmung einer Gleichung einer Regressionsgeraden

$$y = \bar{y} + b(x - \bar{x}) ,$$

mit einer Konfidenzzahl  $\gamma$  wird eine Grösse  $F(c)$  berechnet

10 
$$F(c) = \frac{1}{2}(1 + \gamma) ,$$

mit  $F(c)$  und  $n-2$  ( $n$  = Anzahl Messwerte) Freiheitsgrade liefert die  $t$ -Verteilung (Student-Verteilung) einen Wert  $c$ ,

15 Bestimmung von  $\Delta m$

$$\frac{c\sqrt{a}}{S_x\sqrt{(n-1)(n-2)}} ,$$

wodurch sich eine Unschärfe der Steigung  $m$  ergibt:

20

$$b - \Delta m \leq m \leq b + \Delta m ,$$

Bestimmung der Geradengleichungen (27, 21) mit den Steigungen  $b - \Delta m$ ,  $b + \Delta m$ ,

25 Bestimmung der Schnittpunkte ( $I_{\min}$ , konstant) und ( $I_{\max}$ , konstant) der Geraden mit einer Parallelen (18) ( $y = \text{konstant}$ ),

die einem Grenzwert (18) entspricht,

Bestimmung entsprechender  $x$ -Werte  $I_{\max}$  und  $I_{\min}$ ,

30 wobei  $I_{\max} > I_{\min}$  ist,

Berechnung von  $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$ .

13. Verfahren nach Anspruch 11,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

5

der Wertebereich der Stetigkeit (S) im Bereich 0 und +  $\infty$  liegt.

10 14. Verfahren nach Anspruch 1,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

sich das Gütemaß (K) mit der Zeit verändert, und

dass eine Bewertung der zeitlichen Varianz von

15 Extrapolationsweite (C) wie folgt berechnet wird:

$$C = \frac{\sum \gamma_i * (K(t_i) - q(t))^2}{q^2_{\text{mitt}_K} * \sum \gamma_i}$$

20 wobei i eine Anzahl der Iterationen ist,

wobei  $q^2_{\text{mitt}_K} = [(q_{\text{max}_K} + q_{\text{min}_K})/2]^2$  ist,

wobei  $\gamma_i$  ein Wichtungsfaktor ist.

25



## Zusammenfassung

- 5 Bisher wurden zur Trendanalyse visuelle Extrapolationen  
eines, bspw. kritischen, Messwertverlaufs und/oder subjektive  
Bewertungen der Auswirkungen auf technische Parameter  
vorgenommen, um die Betriebssicherheit einer Maschine  
abzuschätzen.
- 10 Die optimale Anpassung der Extrapolationsfunktion an die  
Datenbasis erfolgt erfindungsgemäss nicht durch einen  
maximalen Korrelationskoeffizienten  $r$ , sondern mit Hilfe  
eines Gütemaßes ( $K$ ) welches von der Steigung einer  
15 Anpassungskurve an eine Datenbasis unabhängig ist.

(Fig. 2)



FIG 3

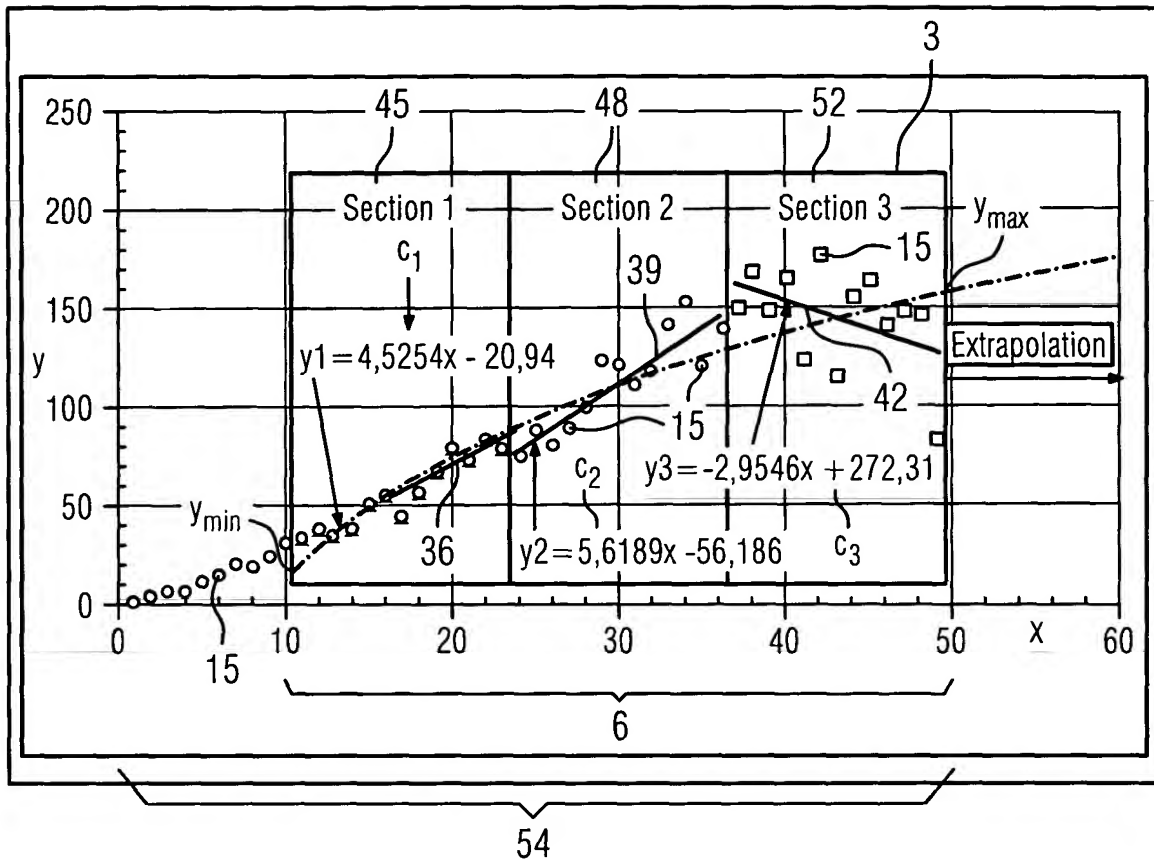


FIG 4

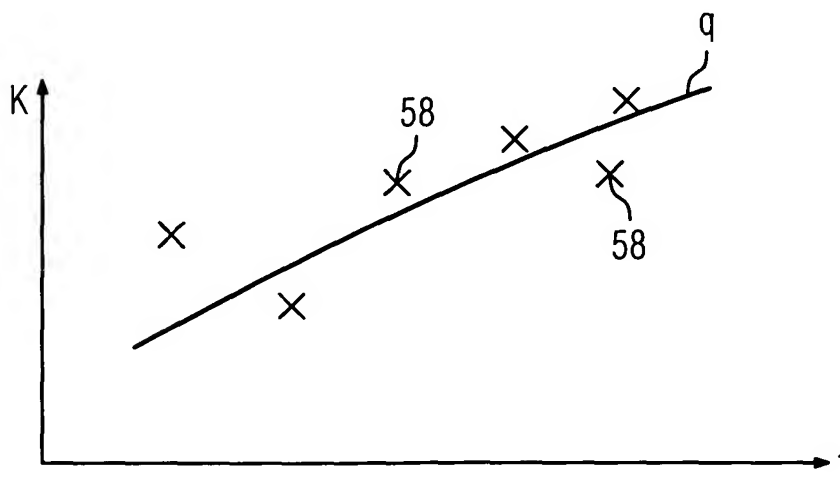


FIG 5

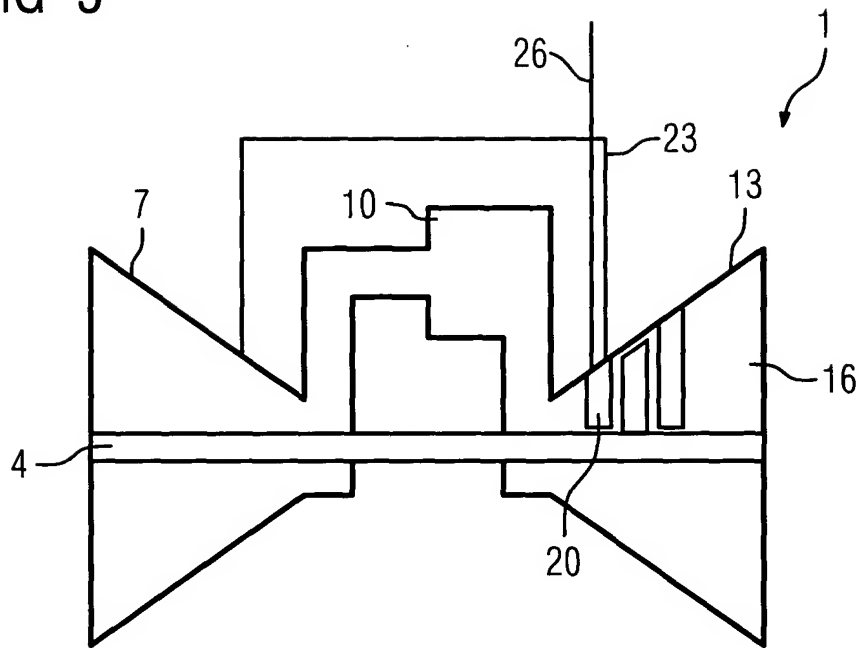


FIG 6

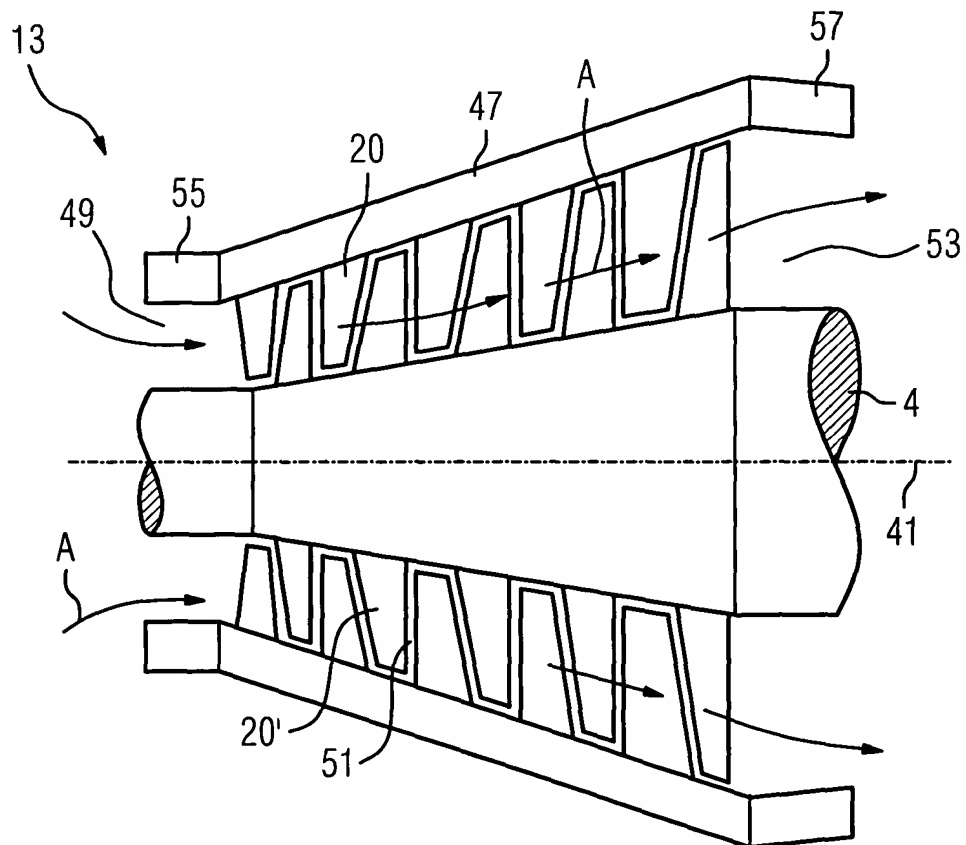


FIG 7

